การประเมินความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างสะพานดอนหอยหลอด เพื่อการออกแบบเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลิเมอร์ (CFRP)

Evaluation of the Regional Bridge (DonHoiLord) for CFRP Structural Strengthening

กิตติ มโนคุ้น[1,*] กิตติภูมิ รอดสิน[2] และ ปรัชญา ยอดดำรงค์[3]

[1,-] ชบ ช ช บ บ ช ค บ ช ช บ บ ช
ร ง บง ล ค ลป ช ท บล ล บง ลม ค ม ง ค ชบม ง
ค ลป ง ถ ค ธ น พธลค ธ บล ล บง ล ช ธ ค บล ธ บ น ล ค ชบม ง

-Corresponding author; E mail address kitti_m@drr.go.th, kittipoom.r@cit.kmutnb.ac.th, pruchaya_yo@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

สะพานดอยหอยหลอดเป็นสะพานข้ามคลองแพรกลึก จ.สมุทรสงคราม มีการใช้งานมานาน และปริมาณจราจรรถบรรทุกหนักจากการขนส่งสินค้าจำนวนมาก กรมทางหลวงชนบทโดยแขวงทางหลวงชนบทสมุทรสงคราม จึงได้ทำการตรวจสอบและประเมินกำลังรับน้ำหนักของสะพาน ด้วยการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสมือนจริง โดยเลือกช่วงโครงสร้างตัวแทนที่ใช้ในการทดสอบ 2 ช่วง มีการติดตั้งเซนเซอร์วัดการแอ่นตัว และความเครียดของสะพาน ผลของการประเมินความความแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการเสริมกำลังโครงสร้างโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลิเมอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymers : CFRP) โดยคำนึงถึงสภาพแวดล้อม พฤติกรรมโครงสร้างปัจจุบัน และปัจจัยต่างๆเกี่ยวข้องกับความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน ผลของการเสริมกำลังโครงสร้างพบว่า การเสริมกำลังสามารถทำให้ระดับค่าความเครียด และการแอ่นตัวบริเวณกึ่งกลางแผ่นคานสะพานที่รองรับพื้นโดยรวมมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอน สามารถช่วยในการลดระดับความเครียดบนแผ่นพื้นและการแอ่นตัวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกได้

คำสำคัญ: การเสริมกำลัง เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลิเมอร์ การทดสอบสะพาน

Abstract

DonHoiLord Bridge or the Regional Bridge is located on a tourism/industrial rural road in Sumutsongkram province. The Sumutsongkram Rural Road Office, Department of Rural Roads evaluated the bridge structure by performing full load tests. The structural responses were measured by using both linear displacement transducers (LVDTs) and strain gages. The test results were then used as a part of information for design strengthening of the bridge using carbon fiber reinforced polymers (CFRP). The full load test was then performed after bridge strengthening. The test results showed that the mid-span deflections including strain levels were reduced. This may conclude that the CFRP strengthening method is the effective method to reduce both stress level and deflection imposed on the bridge structure.

Keywords: Strengthening, Carbon Fiber Reinforced Polymer, Bridge Load Test

1. บทนำ

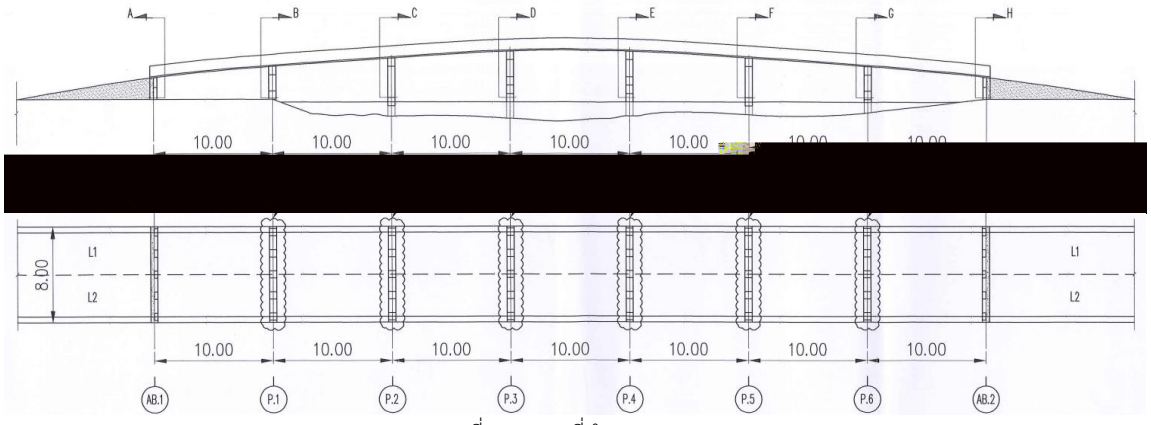
เนื่องด้วยสะพานข้ามคลองแพรกลึกในลำน้ำแม่กลอง ของกรมทางหลวงชนบท ได้มีการใช้งานมาอย่างยาวนาน และมีปริมาณการจราจรจากรถบรรทุกหนักจากการขนส่งสินค้าเป็นจำนวนมาก จึงทำให้ส่งผลกระทบเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในการรับน้ำหนักของสะพานบางส่วน ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการวิเคราะห์ และตรวจสอบความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน อย่างเช่นสำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง (2559) [1] ที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของสะพานข้ามคลองลาต้นไทร สะพานข้ามคลองลาผักชี สะพานข้ามคลองบางเสาธง และสะพานข้ามคลองบ้านระกาศ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของสะพาน (Bridge load test) [2-3] เพื่อประเมินความความแข็งแรงของโครงสร้างคานสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานจริงอีกทั้งในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงเพิ่มความมั่นคงแข็งแรงของสะพานตามมาตรฐาน ACI 440.2R-08 [4] โดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลิเมอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymers) หรือ CFRP จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [5-6] พบว่า การติดตั้ง CFRP มีผลทำให้การรับกำลังดัดของคานสูงขึ้นและช่วยลดการแตกร้าวในคอนกรีต ในการรับน้ำหนักให้กับโครงสร้างคานสะพาน แล้วจึงทำการทดสอบประเมินความความแข็งแรงของโครงสร้างคานสะพานอีกครั้งภายหลังการเสริมกำลังด้วย CFRP เสร็จสิ้น

2. ตัวอย่างการทดสอบ

ในการทดสอบโครงสร้างคานสะพานได้แสดงรูปสะพานไว้ในรูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสะพานมีขนาดความยาวช่วง 7 ช่วง โดยในแต่ละช่วงยาว 10 เมตร โดยพื้นสะพานมีคานสะพานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป (PC.PLANK GIRDER) รองรับ โดยรายละเอียดหน้าตัดสะพานได้แสดงดังรูปที่ 2 โดยมีขนาดหน้าตัดของ PC.PLANK GIRDER เท่ากับ 0.35x0.98 เมตร มีความยาว 10.00 เมตร มีขนาดความกว้างของสะพาน



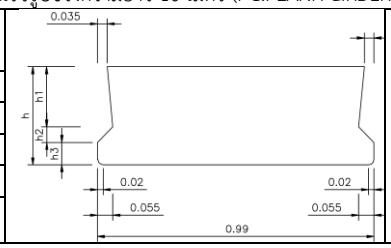


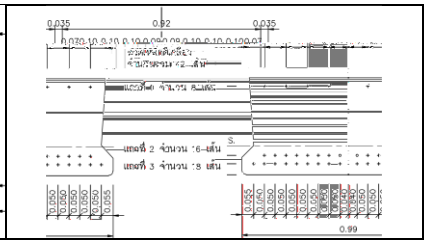


รูปที่ 1 สะพานที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 1 รายละเอียดช่วงคานคานสะพานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปช่วงความยาว 10 เมตร (PC.PLANK GIRDER)

ขนาดมิติต่างๆของคานรูป PLANK GIRDER)	
h	0.35 เมตร
h1	0.215 เมตร
h2	0.055 เมตร
h3	0.08 เมตร
จำนวนลวดเหล็กตัวเกลียว	42 เส้น

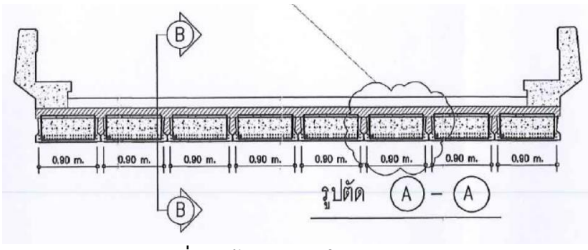




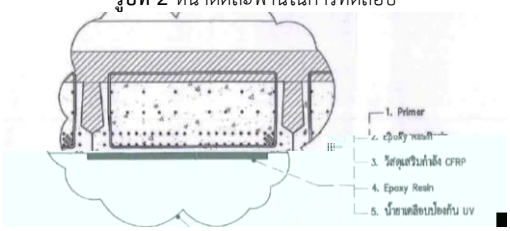
ตารางที่ 2 ตารางคุณสมบัติวัสดุเสริมกำลังคาร์บอนไฟเบอร์

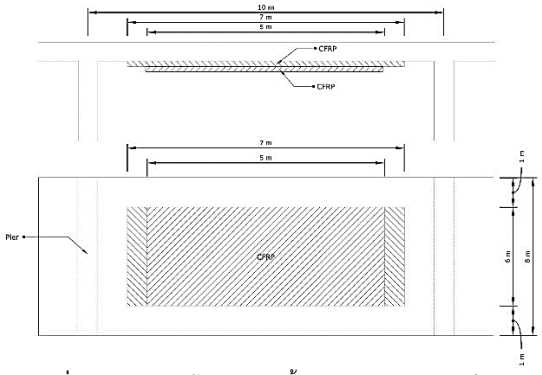
ความหนาของวัสดุเส้นใย	0.16 มิลลิเมตร
หน่วยแรงสูงสุด	3,750 เมกกะปาสคาล
อิลาสติกโมดุลัสของวัสดุเส้นใย	230,000 เมกกะปาสคาล
ความเครียดที่จุดแตกหัก	0.015
จำนวนชั้นการติดตั้ง	2 ชั้น
ความกว้างที่เสริมกำลัง	1,000 มิลลิเมตร

เท่ากับ 8.00 เมตร โดยขนาดมิติต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และใช้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกเท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร ใช้ลวดเหล็กอัดแรงตีเกลียวชนิด 7 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9.5 มิลิเมตร ประเภทความผ่อนคลายต่ำ มีกำลังต้านทานแรงดึงเท่ากับ 1,860 นิวตันต่อตารางมิลิเมตร มีแรงดึงที่ใช้ดึงลวดเท่ากับ 78,300 นิวตันต่อเส้น และในงานวิจัยนี้ ได้มีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานก่อนและหลังการใช้วัสดุเสริมกำลังคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) โดยจะใช้ความกว้างของแผ่นเท่ากับ 1.00 เมตร และติดตั้งการเสริมกำลังด้วย CFRP จากช่วงสะพาน10 เมตรและวัดจากจุดกึ่งกลางออกมาข้างละ 3 เมตร รวมมีความยาวที่เสริมกำลังด้วย CFRP ยาว 6 เมตร มีการติดตั้งแผ่น CFRP จำนวน 2 ชั้น โดยรายละเอียดแปลนและหน้าตัดการติดตั้ง CFRP ได้แสดงดังรูปที่ 3 และได้ทำการติดตั้งทุกช่วง Span ของสะพาน และได้แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของ CFRP ไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 2 หน้าตัดสะพานในการทดสอบ





รูปที่ 3 แปลนและหน้าตัดการติดตั้ง CFRP จำนวน 2 แผ่นในสะพาน

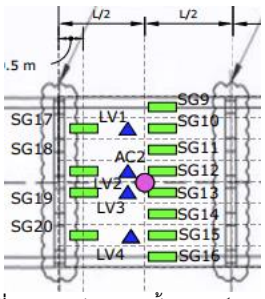
3. การทดสอบ

ในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานก่อนเสริมและหลังเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์นี้ ได้ทำการทดสอบในสภาวะสถิต (Static Load Test) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้ง Linear Variable Differential Transformer (LV) เพื่อตรวจวัดค่าการแอ่นตัว และติดตั้ง strain gauge (SG) เพื่อตรวจวัดค่าการยืดหดตัวที่ผิวท้องคานสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 5



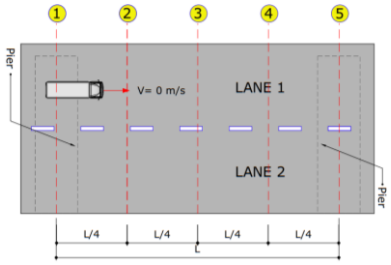
(ก) LV (ข) strain gauge

รูปที่ 4 อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดในโครงสร้างสะพาน

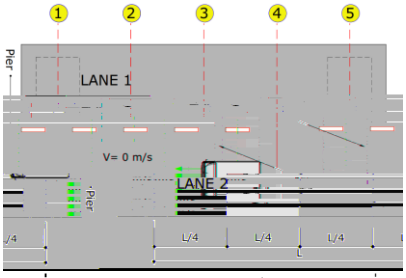


รูปที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

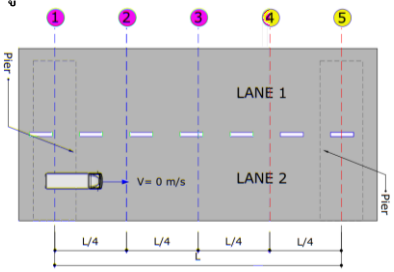
ในงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถออกเป็น 2 ช่องทางเดินรถ ในการทดสอบนี้ใช้รถบรรทุกชนิด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น (3 เพลา 10 ล้อ) จำนวน 2 คัน โดยรถบรรทุกในการทดสอบนี้มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 25 ตันต่อคัน โดยได้แบ่งการทดสอบน้ำหนักบรรทุกออกเป็น 4 กรณี ได้แก่ Load case 1 หมายถึง ใช้รถบรรทุก 1 คัน เคลื่อนที่ในช่องทางที่ 1 อย่างช้าๆโดยไปจอดหยุดนิ่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 6 ตามแนวเส้นประในช่วงความยาวสะพาน ใน Load case 2 หมายถึง ใช้รถบรรทุก 1 คัน เคลื่อนที่ในช่องทางที่ 2 แต่ทิศทางสวนกลับ Load case 1 โดยไปจอดหยุดนิ่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 7 ตามแนวเส้นประใน 1 ช่วงความยาวสะพาน สำหรับ Load case 3 หมายถึง ใช้รถบรรทุก 1 คัน เคลื่อนที่ในช่องทางที่ 2 ในทิศทางเดียวกับ Load case 1 โดยไปจอดหยุดนิ่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 8 ตามแนวเส้นประใน 1 ช่วงความยาวสะพาน และใน Load case 4 หมายถึง ใช้รถบรรทุก 2 คัน เคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 2 ช่องทาง ในทิศทางเดียวกับ Load case 1 โดยไปจอดหยุดนิ่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 9 ตามแนวเส้นประใน 1 ช่วงความยาวสะพาน



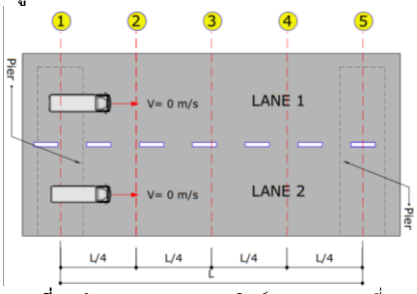
รูปที่ 6 ตำการทดสอบแบบสถิตย์ Load case ที่ 1



รูปที่ 7 ตำการทดสอบแบบสถิตย์ Load case ที่ 2



รูปที่ 8 ตำการทดสอบแบบสถิตย์ Load case ที่ 3



รูปที่ 9 ตำการทดสอบแบบสถิตย์ Load case ที่ 4

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบแบบสถิตศาสตร์ก่อนการเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอน

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าการยืดหดตัวหรือค่าความเครียด (Strain) ที่ตรวจวัดบริเวณกึ่งกลางคานของคานสะพานคอนกรีต ภายใต้ผลของโมเมนต์ดัดมีค่าสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 46 microstrain (Tensile Strain) และค่าความเครียด (Strain) ที่ตรวจวัดบริเวณใกล้กับฐานรองรับของแผ่นพื้นสะพานคอนกรีต ภายใต้ผลของโมเมนต์ดัดมีค่าสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 8 microstrain (Tensile Strain) จากผลของความเครียดที่เป็นบวกแสดงให้เห็นว่าจุดรองรับของพื้นสะพานเป็นแบบยึดหมุนโดยสมบูรณ์ และค่าการแอ่นตัวของคานมีค่าสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 1.90 มิลลิเมตร

4.2 ผลการทดสอบแบบสถิตศาสตร์ก่อนการเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอน

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าการยืดหดตัวหรือค่าความเครียด (Strain) ที่ตรวจวัดบริเวณกึ่งกลางคานของคานสะพานคอนกรีต ภายใต้ผลของโมเมนต์ดัดมีค่าสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 44 microstrain (Tensile Strain) และค่าความเครียด (Strain) ที่ตรวจวัดบริเวณใกล้กับฐานรองรับของแผ่นพื้นสะพานคอนกรีต ภายใต้ผลของโมเมนต์ดัดมีค่าสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 10 microstrain (Tensile Strain) และค่าการแอ่นตัวของคานมีค่าสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 1.84 มิลลิเมตร

จากการทดสอบโครงสร้างสะพานก่อนและหลังเสริมความแข็งแรงด้วยการติดตั้งแผ่นเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าความเครียดบริเวณใกล้ฐานรองรับดังแสดงในรูปที่ 10 และค่าความเครียดบริเวณกึ่งกลางสะพานดังแสดงในรูปที่ 11 และระยะการแอ่นตัวบริเวณกึ่งกลางสะพานดังแสดงในรูปที่ 12

จากการคำนวณกำลังรับโมเมนต์ของหน้าตัดสะพานก่อนการเสริมกำลังมีค่าเท่ากับ 8,089 กิโลนิวตันเมตร และหลังจากเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใย ทำให้สะพานสามารถรับกำลังโมเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 8,389 กิโลนิวตันเมตร ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3

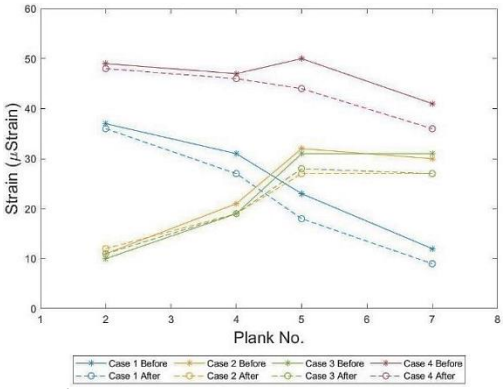
จากผลการประเมินขีดความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพานโดยวิธี LRFR พบว่าค่า Rating Factor (RF) ในระดับ (Inventory) ที่สะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบไว้ได้อย่างปลอดภัย โดยก่อนเสริมกำลังมีค่าเท่ากับ 4.39 และหลังเสริมกำลังด้วย CFRP เท่ากับ 4.61 และในระดับ (Operation) ที่สะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจรตามที่ออกแบบไว้สูงสุดได้อย่างปลอดภัย โดยก่อนเสริมกำลังมีค่าเท่ากับ 5.30 และหลังเสริมกำลังด้วย CFRP เท่ากับ 5.57 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 การคำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัดของสะพาน

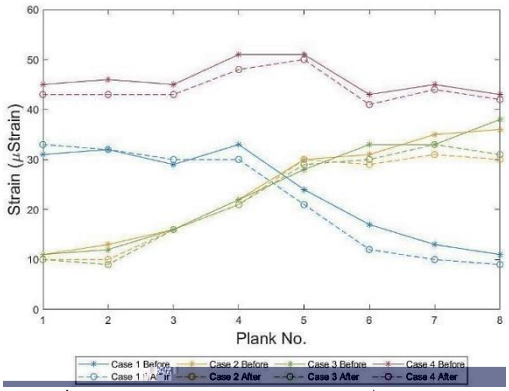
รายการคำนวณ	ก่อนเสริมกำลังด้วย CFRP	หลังเสริมกำลังด้วย CFRP
กำลังรับโมเมนต์ดัด (kN-m)	8,089	8,389

ตารางที่ 4 การคำนวณ Rating Factor (RF) ของสะพาน

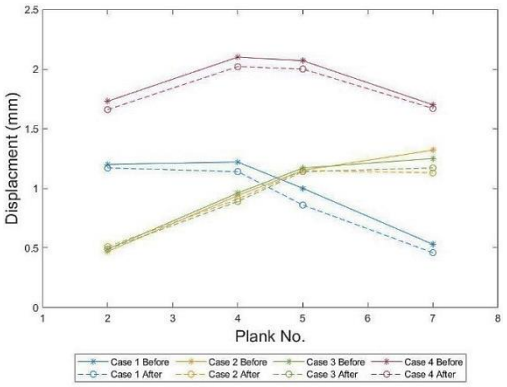
รายการคำนวณ	ก่อนเสริมกำลังด้วย CFRP	หลังเสริมกำลังด้วย CFRP
Rating Factor by LRFR (Inventory)	4.39	4.61
Rating Factor by LRFR (Operation)	5.30	5.57



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าความเครียดบริเวณใกล้ฐานรองรับก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่าความเครียดบริเวณกึ่งกลางสะพานก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวบริเวณกึ่งกลางสะพานก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกทดสอบเพื่อประเมินความสามารถของสะพานในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานก่อนและหลังการเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลิเมอร์ (CFRP) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลิเมอร์ (CFRP) สามารถทำให้ระดับค่าความเครียดบริเวณกึ่งกลางแผ่นคานสะพานที่รองรับพื้นโดยรวมมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอนสามารถช่วยในการลดระดับความเครียดบนแผ่นพื้นที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกได้

2. หลังจากที่เสริมกำลังโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลิเมอร์ ค่าการแอ่นตัวบริเวณกึ่งกลางแผ่นพื้นโดยรวมมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอน สามารถช่วยในการลดระดับการแอ่นตัวของแผ่นพื้นที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกได้

3.เมื่อพิจารณาค่าความเครียดและรวมถึงค่าการแอ่นตัวของสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก พบว่ามีการคืนตัวเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพาน (Unloading) โดยไม่พบการคงค้างของค่าการตอบสนองที่แสดงถึงการเสียรูปถาวร (Permanent Deformation) โดยโครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบโดยรวมมีการตอบสนองอยู่ในช่วง Elastic

4.จากการเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยทำให้สะพานมีกำลังรับโมเมนต์ดัดเพิ่มร้อยละ 3.71

5.จากการประเมินขีดความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพานโดยวิธี LRFR ค่า Rating Factor มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าสะพานยังคงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมทางหลวง (2559). โครงการตรวจวัดสะพาน Box Beam และ Plank Girder ประเภทพื้นต่อเนื่องของกรมทางหลวงเพื่อปรับปรุงการออกแบบ. สานักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

[2] Lantsoght, E., Veen, C., Boer, A., Hordijk, D. A. (2017). State-of-the-art on load testing of concrete bridges. Engineering Structures, 150, pp.231-241.

[3] Hester, D., Brownjohn, J., Bocian, M., Xu, Y. (2017). Low cost bridge load test: Calculating bridge displacement from acceleration for load assessment calculations. Engineering Structures, 143, pp.358-374.

[4] ACI Committee 440. (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2008.

[5] Hollaway, L. C., and Garden, H.N. (1998). An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. Composite Structures, 42, pp.175-188.

[6] Lam L., and Teng J. G., (2003). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. Construction and Building Materials, 17, pp.471-489.